Variations spatio-temporelles de la signature en isotopes stables ($\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$) des eaux du Danube et des communautés marines sur les côtes roumaines de la mer Noire

par

Daniela BANARU & Mireille HARMELIN-VIVIEN (1)

RÉSUMÉ. - Le Danube, deuxième grand fleuve d'Europe, influence la sédimentation et la vie marine dans l'ensemble de la mer Noire. L'étude montre, à travers les valeurs des isotopes stables de $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$, l'impact des fluctuations saisonnières (crue-étiage) des apports de matière organique particulaire (MOP) du fleuve sur les différents compartiments trophiques marins (MOP de l'eau marine, sédiment, macro-invertébrés et poissons) le long des côtes roumaines de la mer Noire. Au total, 670 analyses ont été effectuées sur les échantillons collectés dans 38 stations localisées dans le nord, le centre et le sud des côtes roumaines en octobre 2004 et mai-avril 2005. L'influence des eaux du Danube sur les communautés marines côtières se fait plus sentir dans le nord que dans le sud de ces côtes et est plus forte au printemps qu'en automne. La signature du Danube semble influencer plus particulièrement celles des amphipodes, des copépodes et des polychètes, ainsi que celles de certains poissons, sprat, sevruga (*Acipenser stellatus*), indiquant une utilisation plus importante du carbone d'origine terrestre par ces organismes que par les autres organismes analysés. Les signatures isotopiques des organismes marins de mer Noire analysés présentent des valeurs en $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ plus élevées que celles qui sont rapportées dans la littérature pour des organismes similaires dans d'autres mers.

ABSTRACT. - Spatial and temporal variations of stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) signatures of Danube waters and marine communities on the Black Sea Romanian coasts.

Coastal marine zones located in front of large rivers are of major biological interest. The Danube is the second largest river in Europe after the Volga and represents 58% of the freshwater inputs to the Black Sea. Its delta, located between the North of Romania and the South of Ukraine, has a great impact on the sedimentation and marine ecosystems in the Black Sea. The objective of the present study was to estimate the impact of the seasonal fluctuations of the Danube particulate organic matter (POM) on the various marine trophic compartments (POM sea water, sediment, macro-invertebrates and fish) along the Romanian coasts. The ratios of the stable isotopes of carbon ($^{13}C/^{12}C$) and nitrogen ($^{15}N/^{14}N$) allowed the identification of organic matter sources and the analysis of trophic webs. 670 analysis of stable isotopes of the particulate organic matter (POM) of the Danube water as well as marine POM, marine sediments and marine organisms (macrophytes, polychaetes, bivalves, gastropods, amphipods, macrurids, brachyurids and fishes) has been carried out on samples taken in 38 stations from the Northern, Central et Southern areas of the Romanian coasts in October 2004 and April-May 2005. The POM of the Danube presented average values of $\delta^{13}C$ (-27.61‰) and $\delta^{15}N$ (4.39‰), lower than those of the marine POM of the Black Sea ($\delta^{13}C$ = -24.98‰ and $\delta^{15}N$ = 7.08‰). In the sea, the sediment presented average values decreasing from the North ($\delta^{13}C$ = -20.02‰ and $\delta^{15}N$ = 9.93‰) to the South ($\delta^{13}C$ = -23.59‰, $\delta^{15}N$ = 7.65‰). Among invertebrates, stable isotope values depended on their trophic level and aptitude to consume the terrestrial POM brought by the river. The lowest values were found in polychaetes, copepods and amphipods, and the highest ones in macrurids, brachyurids and gastropods. Among the fish species studied, the lowest values of $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ were observed in starry sturgeon (*Acipenser stellatus ponticus*) and sprat (*Sprattus sprattus*), while the highest values was found in beluga sturgeon (*Huso huso*). These differences were explained mainly by differences in diet. Preliminary results showed a strong influence of the Danube particulate organic matter on the marine compartments of the Romanian coasts. The river influence decreased from the North to the South and was higher in spring when the river was flooding.

Key words. - Danube - Black Sea - Stable isotopes - Terrestrial organic matter - Marine organisms.

Le Danube, deuxième grand fleuve d'Europe après la Volga avec un débit moyen de 6000 m^3s^{-1}, représente 58% des apports d'eau douce à la mer Noire. Son delta, situé entre le nord de la Roumanie et le sud de l'Ukraine, influence la sédimentation et la vie marine dans l'ensemble du nord-ouest de la mer Noire (Gomoiu, 1996).

Les sources de production primaire d'origine marine (phytoplancton, micro- et macrovégétaux benthiques, phanérogames marines) et terrestre (débris de végétaux divers et phytoplancton d'eau douce) qui existent dans les écosystèmes marins côtiers au large des fleuves, présentent des compositions en isotopes stables différentes (Riera *et al.*, 1999 ; Kerhervé *et al.*, 2001). Les rapports des isotopes stables du carbone ($^{13}C/^{12}C$) et de l'azote ($^{15}N/^{14}N$) sont utilisés en écologie comme traceurs de l'origine et du cheminement de la matière ingérée par les organismes dans les réseaux trophiques aquatiques (Peterson et Fry, 1987 ; Vander Zanden *et al.*, 1999). Lors des processus de dégradation

(1) Centre d'océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée, UMR CNRS 6540, Station Marine d'Endoume, 13007 Marseille, FRANCE. [banaru@com.univ-mrs.fr]

et de transfert dans les chaînes alimentaires l'enrichissement en $\delta^{13}C$ est faible (1‰ à 2‰) (De Niro et Epstein, 1978 ; Peterson et Fry, 1987 ; Pinnegar et Polunin, 1999 ; Vander Zanden et Rasmussen, 2001). Le $\delta^{13}C$ est ainsi utilisé comme indicateur de la source de matière organique. Pour l'azote l'enrichissement en isotope lourd $\delta^{15}N$ est plus important (2,5 à 4,5‰) entre une proie et son prédateur et cet élément est utilisé comme indice de niveau trophique (De Niro et Epstein, 1981 ; Minagawa et Wada, 1984 ; Vander Zanden et Rasmussen, 2001 ; Sweeting *et al.*, 2007). Il est alors possible de suivre le cheminement des différentes sources de nourriture au sein des réseaux trophiques si leur signature est différente, en étudiant la composition en isotopes stables des invertébrés (Dauby, 1995 ; Riera et Richard, 1996, 1997) et des poissons (Pinnegar et Polunin, 1999, 2000 ; Dufour et Gerdeaux, 2001 ; Darnaude *et al.*, 2004a, 2004b).

Le but de cette étude a été d'estimer l'impact des apports de matière organique particulaire (MOP) terrestre véhiculée par le Danube, ainsi que de ses fluctuations saisonnières (périodes de crue et d'étiage), sur les différents compartiments trophiques marins (MOP de l'eau, sédiment, macroinvertébrés) qui aboutissent aux poissons le long des côtes roumaines de la mer Noire. Conformément à l'hypothèse de travail de départ, il devrait y avoir des variations spatio-temporelles des signatures en isotopes stables dans les différents compartiments étudiés selon la saison, le site et la profondeur des stations prélevées.

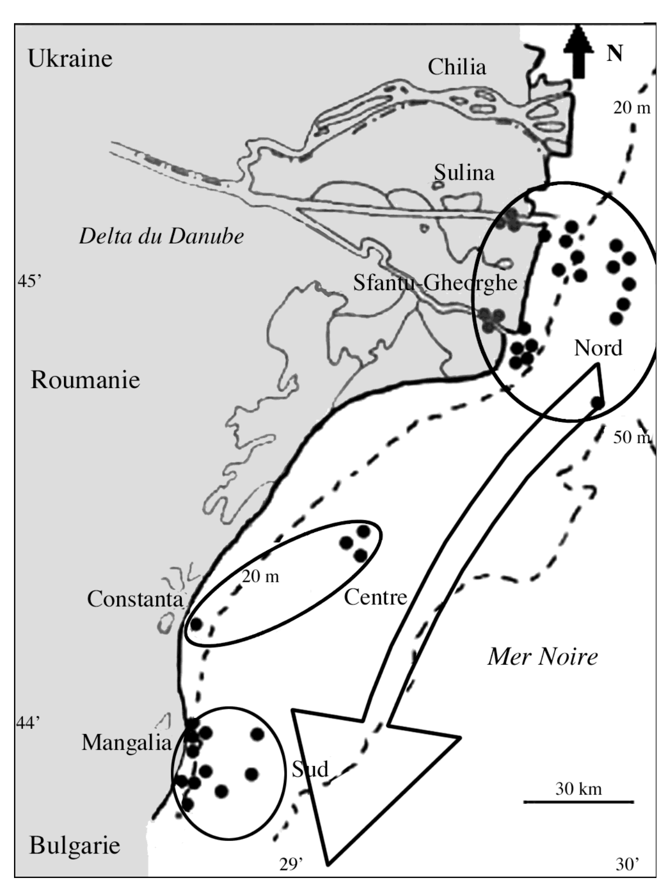


Figure 1. - Carte des stations échantillonnées en octobre 2004, avril et mai 2005 au nord (24 stations), centre (4 stations) et sud (10 stations) des côtes roumaines de la mer Noire. La flèche indique la direction du courant général. *[Map of the sampled stations in October, April and May 2004 - 2005 in the Northern (24 stations), Central (4 stations) and Southern (10 stations) areas on the Romanian Black Sea coasts. The arrow indicates the direction of the general water circulation.]*

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites et périodes d'étude

La zone d'étude est située dans le nord-ouest de la mer Noire (45º12-43º44'N, 29º40'-28º35'E). Les 38 stations étudiées sont situées dans trois sites localisés au nord (24 stations), centre (4 stations) et sud (10 stations) des côtes roumaines (Fig. 1). Les zones nord et centre sont caractérisées par des fonds sablo-vaseux. Dans le sud, les fonds de sable alternent avec des plateaux rocheux ce qui a rendu difficile les prélèvements de sédiment dans cette zone. L'étude a été réalisée à deux saisons, au printemps (avril et mai 2005), pour connaître les effets des crues printanières, et en automne (octobre 2004), pour appréhender les phénomènes en période d'étiage. Les prélèvements ont été effectués à deux profondeurs en fonction de leur éloignement à la côte : 0-20 m (stations côtières) et 20-30 m (stations du large). Le choix de ces profondeurs a été déterminé par la morphologie du plateau continental roumain, qui est très large et peu profond. Par ailleurs, l'échantillonnage a été effectué à partir de bateaux de pêche qui ne travaillaient pas plus au large.

Méthodes d'échantillonnage

Les compartiments prélevés ont été : la MOP de l'eau du Danube dans deux bras, Sulina et Sfantu-Gheorghe, la MOP de l'eau de mer de surface, le sédiment superficiel en milieu marin, les macrophytes, l'endofaune (polychètes, bivalves, gastéropodes, amphipodes, macroures, brachyoures) et quelques espèces de poissons (sprat, anchois, chinchard, gobie, merlan, rouget, sole, plie, turbot, esturgeons). Au total 670 analyses des ratios isotopiques du carbone et de l'azote ont été effectuées sur les échantillons prélevés : 36 pour l'eau du Danube, 74 pour l'eau marine, 65 pour le sédiment, 139 pour l'endofaune et 356 pour les poissons.

L'eau du fleuve provenant des deux bras du Danube ainsi que l'eau de mer de surface ont été filtrées sur filtres en fibres de verre Whatman GF/F pour les analyses des isotopes stables $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ de la MOP (Aminot et Chaussepied, 1983). Les échantillons de sédiment et de l'endofaune ont été prélevés avec une drague benthique (ouverture 50 x 30 cm) ou un chalut benthique. Le sédiment a été récolté en surface (environ 1 cm) et la fraction fine a été séparée des

débris de coquillages afin d'être analysée. Pour la macrofaune, les échantillons de sédiment ont été tamisés et les refus congelés pour conservation durant le transport. Ensuite, l'endofaune a été triée et déterminée jusqu'au niveau du genre ou de l'espèce à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope. L'endofaune des sédiments de la mer Noire est relativement pauvre et les différents groupes zoologiques sont dominés par quelques espèces (Gomoiu, 1999). En fonction des comportements trophiques des principales espèces, établis selon la littérature, les signatures des invertébrés de la macrofaune ont été regroupées par grands groupes taxinomiques.

Les poissons analysés sont des petits pélagiques (sprat, anchois, chinchard) et des poissons démersaux (rouget, merlan, gobie, turbot, plie, sole, sevruga et grand esturgeon). Les poissons ont été capturés à chaque saison avec des chaluts et des filets de pêche. Ils ont été déterminés, mesurés, pesés et congelés. Par la suite, leur dissection a été réalisée afin de prélever des échantillons de muscle blanc à la base de la nageoire dorsale pour l'analyse des isotopes stables. Le muscle des poissons est utilisé pour les analyses des isotopes car il accumule les isotopes lourds (Bode *et al.*, 2003) et présente une variation plus faible que celles des autres tissus (Pinnegar et Polunin, 1999). Ceci réduit considérablement les risques d'erreurs d'interprétation des signatures liés à la taille parfois réduite des effectifs analysés.

Analyses isotopiques

Les échantillons de muscle blanc des poissons, de l'endofaune et du sédiment ont été lyophilisés et préparés en vue des analyses isotopiques selon des techniques standardisées (Jardine *et al.*, 2003). Une étape intermédiaire de décalcification a été réalisée pour la moitié des échantillons des filtres, du sédiment et de l'endofaune à squelette calcaire pour les analyses de $\delta^{13}C$, car le carbone inorganique présente une valeur plus élevée que le carbone organique (De Niro et Epstein, 1978 ; Lorrain *et al.*, 2003 ; Jacob *et al.*, 2005).

L'analyse des signatures en isotopes stables $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ a été effectuée par spectrométrie de masse isotopique en flot continu à combustion assistée par un analyseur élémentaire (Europa Scientific ANCA-NT 20-20 Stable Isotope Analyser with ANCA-NT Solid-Liquid Preparation Module) au Scottish Crop Research Institute (UK) selon la technique décrite par Scrimgeour et Robinson (2003). Les compositions isotopiques sont exprimées par la notation conventionnelle "delta" (δ). Le rapport ^{15}N / ^{14}N et ^{13}C / ^{12}C dans l'échantillon est comparé à la mesure du même rapport pour une référence internationale (l'azote atmosphérique et "Vienna Pee Dee Belemnite carbonate" pour le carbone) dont la valeur est fixée à 0.

L'importance des trois facteurs étudiés (période, site et profondeur) sur la signature en isotopes stables des différents compartiments a été estimée par des analyses de variance à un ou deux facteurs indépendants (ANOVA) selon le type de données.

RÉSULTATS

Matière Organique Particulaire (MOP)

La MOP du Danube présente une signature moyenne en $\delta^{13}C$ significativement différente entre les deux bras étudiés (F = 19,78 ; p < 0,001), tandis que la signature en $\delta^{15}N$ ne diffère pas (F = 3,61 ; p = 0,081) (Tab. I). Le $\delta^{13}C$ de la MOP du bras de Sfantu-Gheorge (Fig. 1), dont le débit est le plus important, est plus élevé que pour le bras Sulina. La saison influence de manière significative la signature en $\delta^{13}C$ (F = 160,49 ; p < 0,001) et en $\delta^{15}N$ (F = 38,56 ; p < 0,001) de la MOP du Danube qui présente des valeurs de $\delta^{13}C$ plus élevées en automne qu'au printemps, alors que l'inverse s'observe pour le $\delta^{15}N$ (Tab. I). Pour le carbone comme pour l'azote, les différences saisonnières sont plus marquées à Sulina qu'à Sfantu-Gheorge.

Les valeurs moyennes des signatures isotopiques de la MOP de l'eau marine de surface sont significativement plus élevées que celles de la MOP du Danube, aussi bien pour le $\delta^{15}N$ (F = 10,74 ; p = 0,002) que pour le $\delta^{13}C$ (F = 38,68 ; p < 0,001) (Tab. I, II). Le $\delta^{15}N$ (F = 25,77 ; p < 0,001) et le $\delta^{13}C$ (F = 22,50 ; p < 0,001) varient significativement avec le site, avec des valeurs plus élevées dans le sud que dans le nord (Tab. II). La saison influence significativement la signature en carbone (F = 9,07 ; p < 0,001) avec des valeurs plus élevées en automne qu'au printemps, mais n'a pas d'effet sur la signature en azote (F = 0,88 ; p = 0,425). La profondeur, qui correspond aussi à l'éloignement à la côte, agit significativement sur les deux paramètres (F = 8,31 ;

Tableau I. - Valeurs moyennes et écart-types (SD) en $\delta^{15}N$ (‰) et $\delta^{13}C$ (‰) de la MOP du Danube et débits moyens sur les deux bras analysés, Sulina et Sfantu-Gheorghe, aux mois d'octobre, avril et mai 2004-2005. Le nombre d'analyses effectuées est de n = 36 (3 analyses x 3 mois x 2 bras x 2 types d'analyses pour le carbone et pour l'azote). *[Mean values and standard deviations (SD) of $\delta^{15}N$ (‰) and $\delta^{13}C$ (‰) of the Danube POM and mean flow of the two canals analysed: Sulina and Sfantu-Gheorghe in October, April and May 2004-2005: n = 36 number of samples analysed.]*

	Octobre 2004	Avril 2005	Mai 2005	Moyenne ± SD
Sulina				
Débit (m^3s^{-1})	938	2000	2260	1733
$\delta^{13}C$ (‰)	-26.37 ± 0.36	-29.66 ± 0.42	-27.59 ± 0.09	-27.87 ± 1.46
$\delta^{15}N$ (‰)	2.23 ± 0.97	4.55 ± 0.31	7.17 ± 0.13	4.65 ± 2.20
Sfantu -Gheorghe				
Débit (m^3s^{-1})	1200	2700	2700	2200
$\delta^{13}C$ (‰)	-26.71 ± 0.23	-28.48 ± 0.12	-26.83 ± 0.08	-27.34 ± 0.87
$\delta^{15}N$ (‰)	4.07 ± 0.54	3.51± 0.73	4.83 ± 0.32	4.13 ± 0.75
Moyenne des deux bras du Danube				
$\delta^{13}C$ (‰)	-26.54 ± 0.33	-29.07 ± 0.70	-27.21 ± 0.42	-27.61 ± 1.12
$\delta^{15}N$ (‰)	3.15 ± 1.23	4.03 ± 0.76	6.00 ± 1.30	4.39 ± 1.67

Tableau II. - Valeurs moyennes et écart-types (SD) en $\delta^{15}N$ (‰) et $\delta^{13}C$ (‰) de la MOP marine dans les différents sites, profondeurs et saisons étudiés le long des côtes roumaines : n = nombre d'échantillons analysés. *[Mean values and standard deviations (SD) of $\delta^{15}N$ (‰) and $\delta^{13}C$ (‰) in the marine POM in different areas, depths and seasons on the Romanian coasts: n = number of samples analysed.]*

Site	Profondeur (m)	Mois	n	$\delta^{15}N$ (‰) ± SD	n	$\delta^{13}C$ (‰) ± SD
Nord	0-20	X	3	2.37 ± 1.09	3	-24.33 ± 0.10
Nord	0-20	IV	5	4.36 ± 1.12	5	-26.69 ± 1.66
Nord	0-20	V	6	6.84 ± 0.99	6	-25.66 ± 1.09
Nord	20-30	IV	1	10.23	1	-25.79
Nord	20-30	V	3	6.02 ± 0.26	3	-23.52 ± 0.08
Centre	0-20	X	3	7.50 ± 1.11	3	-25.65 ± 0.14
Centre	20-30	V	2	7.72 ± 0.35	2	-26.75 ± 0.33
Sud	0-20	X	3	9.29 ± 1.26	3	-21.67 ± 0.81
Sud	0-20	IV	2	7.17 ± 0.92	2	-24.8 ± 1.72
Sud	0-20	V	2	6.22 ± 0.45	2	-24.18 ± 1.49
Sud	20-30	X	3	11.07 ± 0.46	3	-20.43 ± 0.10
Sud	20-30	IV	2	5.05 ± 1.16	2	-22.93 ± 1.61
Sud	20-30	V	2	7.08 ± 0.93	2	-24.04 ± 0.00
Moyenne / site						
Nord			18	5.96 ± 0.86	18	-25.2 ± 0.73
Centre			5	7.61 ± 0.73	5	-26.2 ± 0.24
Sud			14	7.66 ± 0.79	14	-23.55 ± 0.87
Moyenne / mois						
		X	12	7.56 ± 0.98	12	-23.02 ± 0.29
		IV	10	6.70 ± 1.07	10	-25.06 ± 1.67
		V	15	6.78 ± 0.59	15	-24.83 ± 0.60
Moyenne / profondeur						
	0-20		24	6.25 ± 0.99	24	-24.71 ± 1.00
	20-30		13	7.86 ± 0.63	13	-23.91 ± 0.42
Moyenne générale						
			37	7.08 ± 0.74	37	-24.98 ± 0.56

Tableau III. - Valeurs moyennes et écart-types (SD) en $\delta^{15}N$ (‰) et $\delta^{13}C$ (‰) du sédiment de la zone du nord et du sud à différentes profondeurs et périodes : n = nombre d'échantillons analysés. *[Mean values and standard deviation (SD) of $\delta^{15}N$ (‰) and $\delta^{13}C$ (‰) in the sediment from the North and South areas at different depths and periods: n = number of samples analysed.]*

Site	Prof. (m)	Mois	n	$\delta^{15}N$ (‰) ± SD	n	$\delta^{13}C$ (‰) ± SD
Nord	0-20	IV	12	4.51 ± 1.00	12	-27.25 ± 0.18
Nord	20-30	IV	4	10.5 ± 0.93	4	-21.47 ± 0.42
Nord	0-20	V	3	8.55 ± 0.20	3	-24.97 ± 0.15
Nord	20-30	V	4	9.93 ± 1.32	4	-20.02 ± 0.08
Nord	0-20	X	3	4.68 ± 0.3	3	-23.53 ± 1.14
Nord	20-30	X	3	3.63 ± 0.54	3	-23.88 ± 1.67
Moyenne Nord			29	6.97 ± 1.06	29	-23.52 ± 0.78
Sud	20-30	V	4	7.65 ± 0.47	3	-23.59 ± 0.35
Moyenne générale			33	7.31 ± 0.76	32	-23.55 ± 0.56

$p = 0{,}007$ pour le $\delta^{13}C$; $F = 4{,}42$; $p = 0{,}049$ pour le $\delta^{15}N$). Les valeurs les plus faibles sont trouvées près de la côte à faible profondeur ($\delta^{13}C$ = -24,92‰ ± 1,95 ; $\delta^{15}N$ = 5,93‰ ± 2,33) et les valeurs les plus élevées plus profondément au large ($\delta^{13}C$ = -22,87‰ ± 1,82 ; $\delta^{15}N$ = 7,79‰ ± 2,57).

Sédiments

Le sédiment superficiel présente en moyenne des valeurs de $\delta^{13}C$ et de $\delta^{15}N$ plus élevées que celles de la MOP marine, mais ces différences ne sont pas significatives ($F = 0{,}6$; $p > 0{,}05$ pour les deux paramètres) (Tab. III). À profondeur et mois comparables, les signatures isotopiques en C et N du sédiment sont plus élevées au nord qu'au sud. Enfin, dans le nord où ces variations ont pu être analysées, le sédiment superficiel présente des signatures en $\delta^{13}C$ et de $\delta^{15}N$ plus élevées au printemps qu'en automne ($F = 5{,}13$; $p = 0{,}002$) et plus élevées au large qu'à la côte ($F = 11{,}60$; $p < 0{,}001$) (Tab. III).

Macro-invertébrés et macrophytes

Les signatures isotopiques moyennes des macro-invertébrés diffèrent selon les espèces et les groupes taxinomiques auxquels ils appartiennent (Tab. IV). Leurs valeurs en $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ augmentent, en général, de l'automne au printemps. Le $\delta^{13}C$ augmente du nord vers le sud, tandis que le $\delta^{15}N$ diminue. Le site influence significativement la signature des macrophytes ($F = 6{,}56$; $p = 0{,}011$) et des brachyures ($F = 48{,}54$; $p < 0{,}001$), et la saison celle des macrophytes ($F = 10{,}35$; $p = 0{,}002$), des polychètes ($F = 12{,}65$; $p = 0{,}002$) et des brachyures ($F = 45{,}08$; $p < 0{,}001$). Les valeurs de $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ les plus faibles ont été trouvées chez les polychètes, les copépodes et les amphipodes, et les plus élevées chez les macroures, les brachyoures et les gastéropodes (Fig. 2).

Poissons

Les signatures isotopiques des poissons varient en fonction de l'espèce et du site (Tab. V). Les espèces pélagiques comme le sprat, l'anchois et le chinchard ont les signatures en $\delta^{15}N$ les plus faibles ce qui indique un niveau trophique plus bas. À l'inverse, les grands prédateurs comme le grand esturgeon et le turbot ont des signatures élevées en $\delta^{15}N$ qui témoignent d'un niveau trophique plus élevé (Fig. 2). Comme pour les autres compartiments, les signatures isotopiques en $\delta^{13}C$ de la plupart des poissons augmentent du nord vers le sud (Tab. V) suivant en cela la diminution de l'impact du Danube, sur les communautés marines. L'échantillonnage de toutes ces espèces dans toutes les stations n'a pas été possible car certaines effectuent des migrations et leurs signatures en isotopes stables ne seront donc pas comparées en fonction des saisons ou du site.

DISCUSSION

Le fonctionnement de certaines zones marines côtières est largement influencé par les apports de matière organique continentale véhiculée par les fleuves (Cloern, 2001). Les résultats préliminaires de cette étude montrent une influence forte de la MOP apportée par le Danube sur les différents

Tableau IV. - Variations saisonnières et annuelles des moyennes en δ13C (‰) et δ15N (‰) (minimum -maximum) pour quelques groupes d'organismes présents dans le benthos sur les côtes roumaines de la mer Noire : n = nombre d'espèces analysées, nº = nombre d'échantillons, Min. = minimum, Max. = maximum, N = nord, C = centre, S = sud, moy. = moyenne. *[Seasonal and annual variations of the mean values of δ15N (‰) and δ13C (‰) (minimum -maximum) for some groups of benthic organisms on the Romanian coasts of the Black sea: n = number of species analysed, nº = number of samples analysed, Min. = minimum, Max. = maximum, N = North, C = Center, S = South, moy. = average.]*

Taxon	(‰)	n/nº	Min.	Max.	Octobre (moy.)			Avril- Mai (moy.)			moy.
					N	C	S	N	C	S	
Macrophytes	δ13C	5/28	-29.79	-16.65	-	-	-17.36	-24.44	-21.12	-21.33	-21.06
	δ15N		6.20	12.21	-	-	10.07	8.07	12.21	8.55	9.72
Polychètes	δ13C	3/16	-27.21	-18.32	-	-18.32	-	-23.19	-19.99	-20.62	-20.53
	δ15N		6.54	15.53	-	15.20	-	11.58	12.23	11.67	12.67
Copépodes	δ13C	>1/3	-22.9	-	-	-	-	-	-	-22.90	-22.90
	δ15N		10.133	-	-	-	-	-	-	10.13	10.13
Amphipodes	δ13C	/12	-26.27	-23.74	-23.74	-	-	-26.27	-	-24.16	-24.73
	δ15N		9.01	11.40	9.48	-	-	11.40	-	9.01	9.96
Macroures	δ13C	1/22	-24.35	-17.08	-20.08	-	-	-19.99	-17.83	-17.08	-18.75
	δ15N		7.31	15.48	14.09	-	-	14.24	14.56	15.10	14.50
Brachyures	δ13C	3/10	-20.35	-18.01	-18.33	-	-	-20.18	-18.18	-22.90	-19.90
	δ15N		12.44	13.96	12.53	-	-	13.03	13.20	10.13	12.22
Bivalves	δ13C	7/36	-24.36	-17.79	-	-20.38	-19.95	-22.74	-19.32	-20.40	-20.56
	δ15N		7.32	11.24	-	10.59	9.89	9.08	9.94	9.50	9.80
Gastéropodes	δ13C	1/12	-17.74	-17.06	-	-17.68	-	-	-17.74	-17.06	-17.49
	δ15N		11.42	12.96	-	12.96	-	-	11.42	11.67	12.02

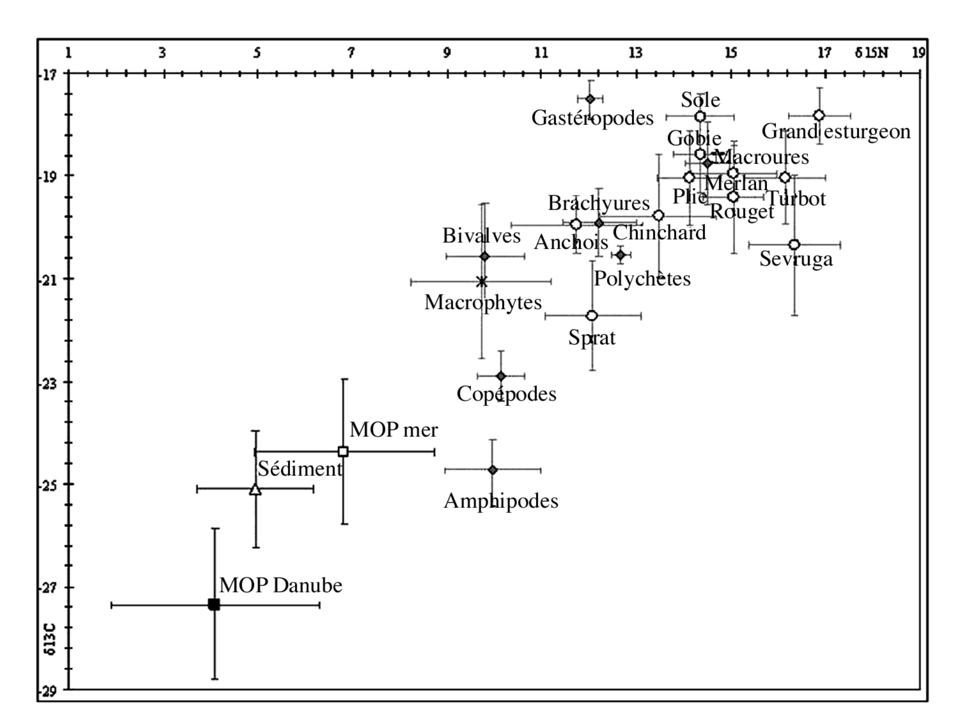


Figure 2. - Structure du réseau trophique marin au large du Danube en mer Noire réalisé avec la moyenne des deux périodes d'échantillonnage des valeurs en isotopes stables de l'azote δ15N et du carbone δ13C pour les différents compartiments analysés (MOP du Danube, MOP marine, sédiment marin, macro-invertébrés benthiques et poissons). *[Structure of the marine food web in the Black Sea in front of the Danube with mean values of the two sampled seasons of the nitrogen δ15N and carbon δ13C stable isotopes signatures in the different compartments analysed (POM of the Danube, POM of sea water, marine sediment, macrobenthic invertebrates and fishes).]*

compartiments marins des côtes roumaines de la mer Noire.

L'interprétation des résultats est rendue plus difficile par un certain nombre de données manquantes (pour les prélèvements d'eau de mer : station du nord 20-30 m en octobre 2004, stations du centre 0-20 m en avril et mai 2005, station du centre 20-30 m en octobre 2004 et, pour les prélèvements du sédiment, la majorité des stations du sud). De plus, les différentes espèces présentes dans l'endofaune n'ont pas été retrouvées systématiquement dans toutes les stations, de même que certaines espèces de poissons qui effectuent des migrations saisonnières pour se nourrir ou se reproduire dans cette zone (Cautis, 1977).

Tableau V. - Noms latins, noms communs et valeurs moyennes des signatures en $\delta^{13}C$ (‰) et $\delta^{15}N$ (‰) des poissons étudiés sur les côtes roumaines de la mer Noire : n = nombre d'individus analysés. *[Latin and common names, and mean values of the stable isotope signatures in $\delta^{15}N$ (‰) and $\delta^{13}C$ (‰) of fishes analysed on the Romanian coasts of the Black Sea: n = number of samples analysed.]*

	Nord			Centre - Sud			Moyenne		
Espèce Nom commun fr./angl.	n	$\delta^{15}N$ (‰)	$\delta^{13}C$ (‰)	n	$\delta^{15}N$ (‰)	$\delta^{13}C$ (‰)	n	$\delta^{15}N$ (‰) ± SD	$\delta^{13}C$ (‰) ± SD
Sprattus sprattus (Linnaeus, 1758) Sprat / European sprat	20	11.84	-21.79	45	11.88	-21.94	65	11.86 ± 1.02	-21.87 ± 1.06
Engraulis encrasicholus (Linnaeus, 1758) Anchois / European anchovy	-	-	-	16	11.74	-19.95	16	11.74 ± 1.40	-19.95 ± 0.56
Trachurus mediterraneus ponticus (Aleev, 1956) Chinchard / Horse mackerel	11	14.19	-20.33	12	12.84	-19.26	23	13.52 ± 1..23	-19.79 ± 1.20
Apollonia melanostoma (Pallas, 1814) Gobie / Round goby	17	14.37	-19.13	70	14.39	-18.42	87	14.38 ± 0.57	-18.77 ± 0.74
Mullus barbatus ponticus (Linnaeus, 1758) Rouget / Red mullet	16	14.91	-20.59	25	14.97	-19.06	41	14.94 ± 0.64	-19.83 ± 1.09
Merlangus merlangus euxinus (Nordmann, 1840) Merlan / Whiting	20	15.86	-19.34	48	14.74	-18.79	68	15.30 ± 0.91	-19.06 ± 0.54
Psetta maxima (Linnaeus, 1758) Turbot / Turbot	22	16.39	-19.36	4	14.69	-18.73	26	15.54 ± 0.87	-19.04 ± 0.90
Solea nasuta (Risso, 1810) Sole / Sand sole	1	14.84	-18.53	3	14.42	-17.60	4	14.63 ± 0.71	-18.07 ± 0.46
Pleuronectes flesus luscus (Linnaeus, 1758) Plie / Flounder	8	13.88	-20.25	9	14.23	-18.30	17	14.06 ± 0.68	-19.27 ± 0.94
Acipenser stellatus ponticus (Pallas, 1771) Sevruga / Starry sturgeon	7	15.93	-20.23	-	-	-	7	15.93 ± 0.97	-20.23 ± 1.37
Huso huso (Linnaeus, 1758) Grand esturgeon / Beluga	2	16.87	-17.82	-	-	-	2	16.87 ± 0.65	-17.82 ± 0.55

Influence de la saison

La signature moyenne du Danube est donnée par les détritus provenant des végétaux terrestres ainsi que par le phytoplancton dulçaquicole. Au printemps, l'augmentation du $\delta^{15}N$ et la diminution du $\delta^{13}C$ est probablement à relier au développement du phytoplancton du Danube, ainsi qu'il a été montré pour d'autres fleuves (Riera et Richard, 1997 ; Kendall *et al.*, 2001).

La signature de la MOP marine de surface mesurée est donnée par le plancton marin (phyto- et bactério-plancton) et par les particules de MOP terrestre amenées par le fleuve. La MOP de l'eau de mer de surface de la mer Noire présente des signatures en $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ plus élevées que celles de la MOP du Danube, ainsi que Carlier *et al.* (2006) l'ont aussi observé en Méditerranée. L'influence du Danube sur la signature de la MOP de l'eau de mer est plus importante au printemps, en période de crue du fleuve, ainsi que le montre la diminution des valeurs du $\delta^{13}C$. Les valeurs en $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ du sédiment augmentent au printemps, peut-être à cause de la sédimentation du phytoplancton marin et des processus de dégradation de la MOP par les bactéries et la méiofaune (Mc Connaughey et Mc Roy, 1979).

Parmi les organismes étudiés la saison influence plus les polychètes et les brachyures parmi les invertébrés, de même que les gobies, les turbots et les soles qui effectuent peu de migrations par rapport aux autres espèces de poissons étudiées.

Influence de la localisation

L'influence du Danube sur les compartiments marins analysés diminue de la côte vers le large et du nord vers le sud avec l'éloignement des embouchures et dans le sens du courant général de circulation des masses d'eau sur les côtes roumaines (Antipa, 1941). La signature du sédiment marin est intermédiaire entre les valeurs de la MOP du Danube et de la MOP marine ce qui suggère une influence des deux sources : sédimentation des particules terrestres amenées par le fleuve et du phytoplancton marin, ainsi que cela a été

montré dans d'autres régions (Darnaude *et al.*, 2004a). Le long du littoral roumain, la diminution des $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ des sédiments du nord au sud traduit une migration de ces derniers dans le sens du courant (Fig. 1), qui fait que les sédiments du Danube sont transportés vers le sud des côtes roumaines et ensuite vers le Bosphore (Panin, 2005).

Structure trophique et régime alimentaire

Les valeurs moyennes des différents compartiments analysés (MOP du Danube, MOP marine, sédiment marin, macro-invertébrés benthiques et poissons) pendant les deux saisons nous ont permis de représenter leur positionnement dans la structure du réseau trophique de la mer Noire (Fig. 2). Les faibles valeurs $\delta^{13}C$ du fleuve semblent influencer plus particulièrement celles des amphipodes, des copépodes et des polychètes, qui consommeraient ainsi plus de particules d'origine terrestre amenées par le fleuve que les autres groupes d'invertébrés. En revanche, les bivalves, les macroures, les gastéropodes et les brachyures, dont la signature en $\delta^{13}C$ est plus élevée, ont une alimentation dont la base semble plutôt constituée par le phytoplancton marin. Des résultats similaires pour certains groupes (utilisation de la MOP terrestre par les polychètes et du phytoplancton marin par les bivalves et les crustacés décapodes) ont été trouvés dans le golfe du Lion au large du Rhône (Darnaude *et al.*, 2004a, b). La signature en $\delta^{15}N$ des amphipodes, copépodes et bivalves est plus faible et démontre un niveau trophique plus bas que celui des autres groupes d'invertébrés analysés. Ce regroupement des espèces de l'endofaune a été réalisé afin de faciliter l'interprétation des données. Cependant, il y a des variations de signatures entre les différentes espèces d'un même groupe du fait que leur statut trophique peut être différent. Une étude plus approfondie des relations trophiques au sein de l'endofaune nécessitera une analyse des données au niveau spécifique.

Les poissons dont l'alimentation est basée en partie sur des proies qui utilisent des sources terrestres de carbone ont une signature plus faible en $\delta^{13}C$ (sprat, sévruga). Les petits pélagiques planctonophages (sprat, anchois, chinchard) présentent les signatures en $\delta^{15}N$ les plus faibles, tandis que les poissons ichtyophages (turbot, sevruga et esturgeons) présentent de fortes valeurs, indiquant un niveau trophique élevé. Des différences similaires de $\delta^{15}N$ ont été mises en évidence entre espèces planctonophages et piscivores en Méditerranée (Pinnegar et Polunin, 2000). Les valeurs des signatures moyennes en $\delta^{15}N$ des rougets, merlans, gobies, soles et plies, qui consomment des invertébrés benthiques, sont assez proches.

Un traitement individuel des signatures en isotopes stables de chacune de ces espèces de poissons par taille, site, profondeur et saison, ainsi que la mise en relation avec leurs contenus stomacaux permettra par la suite d'effectuer une meilleure analyse de leur comportement alimentaire ainsi que de l'influence du Danube sur leur signature isotopique.

Des analyses complémentaires de la composition en acides gras seraient également utiles pour une meilleure analyse du comportement alimentaire de ces organismes (Ruess *et al.*, 2004).

Comparaison avec le système Rhône-Méditerranée

Les signatures isotopiques des organismes marins de mer Noire analysés présentent des valeurs plus élevées en $\delta^{13}C$ et surtout en $\delta^{15}N$ que celles qui sont rapportées dans la littérature pour des organismes similaires en Méditerranée nord-occidentale (Darnaude *et al.*, 2004a, 2004b ; Carlier *et al.*, 2007) suggérant des fonctionnements différents des communautés marines soumises aux apports de grands fleuves. Ceci peut être dû aux particularités physico-chimiques et biologiques de la mer Noire. La zone étudiée est caractérisée par des écarts de température (0-35°C) et de salinité (1-18 psu) très importants. Jennings et Warr (2003) montrent que dans les sites où la température de l'eau est plus élevée et la salinité plus faible les organismes ont une tendance à un enrichissement en $\delta^{15}N$.

Cette étude est une première approche dans la compréhension des réseaux trophiques des poissons dans le nord-ouest de la mer Noire ainsi que de l'impact des apports du Danube sur les communautés marines côtières.

Remerciements. - D. Banaru est titulaire d'une bourse du Gouvernement français pour une thèse en cotutelle entre le Centre d'océanologie de Marseille, UMR CNRS 6540 et l'Université Ovidius de Constanta, Roumanie.

RÉFÉRENCES

AMINOT A. & M. CHAUSSEPIED, 1983. - Manuel des Analyses chimiques en Milieu marin. Brest: CNEXO.

ANTIPA G., 1941. - Marea Neagra - Oceanografia, Bionomia si Biologia generala a marii Negre. Vol. I. Bucuresti: Imprimeria Nationala. Publ. fond."V.Adamachi", 10, (55): 313.

BODE A., ALVAREZ-OSSORIO M.T., CARRERA P. & J. LORENZO. 2003. - Reconstruction of trophic pathways between plankton and the North Iberian sardine (*Sardina pilchardus*) using stable isotopes. *Sci. Mar.*, 68(1): 165-178.

CARLIER A., RIERA P., AMOUROUX J.-M., BODIOU J.-Y. & A. GREMARE, 2007. - Benthic trophic network in the Bay of Banyuls-sur-Mer (northwest Mediterranean, France): An assessment based on stable carbon and nitrogen isotopes analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 72: 1-15.

CAUTIŞ I., 1977. - Migration des poissons de la mer Noire. Biologie des eaux saumatres de la mer Noire. *IRCM Constanta*, 154-164.

CLOERN J.E., 2001. - Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser*, 210: 223-253.

DARNAUDE A.M., SALEN-PICARD C., POLUNIN N.V.C. & M.L. HARMELIN-VIVIEN, 2004a. - Trophodynamic linkage between river run-off and coastal fishery yield elucidated by stable isotope data in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oecologia*, 138: 325-332.

DARNAUDE A.M., SALEN-PICARD C. & M.L. HARMELIN-VIVIEN, 2004b. - Depth variation in terrestrial particulate organic matter exploitation by marine coastal benthic communities off the Rhone River delta (NW Mediterranean). *Mar. Ecol. Prog. Ser*, 275: 47-57.

DAUBY P.A., 1995. - A $\delta^{13}C$ study of the feeding habits in four Mediterranean *Leptomysis* species (Crustacea: Mysidacea). *PSZNI Mar. Ecol*., 16: 93-102.

DUFOUR E. & D. GERDEAUX, 2001. - Apport des isotopes stables ($^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{18}O/^{16}O$, $^{36}S/^{34}S$, $^{87}Sr/^{86}Sr$) aux études écologiques sur les poissons. *Cybium*, 25: 369-382.

DE NIRO M.J. & S. EPSTEIN, 1978. - Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2: 495-506.

DE NIRO M.J. & S. EPSTEIN, 1981. - Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 341-351.

GOMOIU M.-T., 1996. - Some remarks concerning actual state of the Danube River-Black Sea ecological system. *Geo-Eco-Marina (Danub. Delta-Black Sea Syst. Glob. Chang. Impact)*, 1: 31-33.

GOMOIU M.-T., 1999. - Remarks on the benthic organisms diversity of the NW Black Sea. *Geo-Eco-Marina, (Mod. Anc. Sedim. Environ. Process.)*, 4: 49-72.

JACOB U., MINTENBECK K., BREY T., KNUST R. & K. BEYER, 2005. - Stable isotope food web studies: A case for standardized sample treatment. *Mar. Ecol. Prog. Ser*, 287: 251-253.

JARDINE T.D., MCGEACHY S.A., PATON C.M., SAVOIE M. & R.A. CUNJAK, 2003. - Stables isotopes in aquatic systems: Sample preparation, analysis, and interpretation. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci*., 39 p.

JENNINGS S. & K.J. WARR, 2003. - Smaller predator-prey body size ratios in longer food chain. *Proc. R. Soc. Biol. Sci*., 270: 1413-417.

KENDALL C., SILVA S.R. & V.J. KELLY, 2001. - Carbon and nitrogen isotopic compositions of paticulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrol. Process*., 15: 1301-1346.

KERHERVÉ P., MINAGAWA M., HEUSSNER S. & A. MONACO, 2001. - Stable isotopes ($^{13}C/^{12}C$ and $^{15}N/^{14}N$) in settling organic matter of the northwestern Mediterranean Sea: Biogeochemical implications. *Oceanol. Acta*, 24 (suppl.): 577-585.

LORRAIN A., SAVOYE N., CHAUVAUD L., PAULET Y.-M. & N. NAULET, 2003. - Decarbonation and preservation method for the analysis of organic C and N contents and stable isotope ratios of low-carbonated suspended particulate material. *Analyt. Chim. Acta*, 491: 125-133.

Mc CAUNNAUGHEY T. & C.P. Mc ROY, 1979. - Food web structure and the fractionation of carbon isotopes in the Berring Sea. *Mar. Biol*., 53: 257-262.

MINAGAWA M. & E. WADA, 1984. - Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}N$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 1135-1140.

PANIN N, 2005. - The Black Sea coastal zone - an overview. *Geo-Eco-Marina (Europ. Seas: Coast. Zones Rivers - Sea Syst.)*, 11: 21-40.

PETERSON B.J. & B. FRY, 1987. - Stable isotopes in ecosystem studies. *Annu. Rev. Ecol. Syst*., 18: 293-320.

PINNEGAR J.K. & N.V.C. POLUNIN, 1999. - Differential fractionation of $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ among fish tissues: Implications for the study of trophic interactions. *Funct. Ecol*., 13: 225-231.

PINNEGAR J.K. & N.V.C. POLUNIN, 2000. - Contributions of stable-isotope data to elucidating food webs of Mediterranean rocky littoral fishes. *Oecologia*, 122: 399-409.

RIERA P. & P. RICHARD, 1996. - Isotopic determination of food sources of *Crassostrea gigas* along a trophic gradient in the estuarine bay of Marennes-Oléron. *Estuar. Coast. Shelf Sci*., 42: 347-360.

RIERA P. & P. RICHARD, 1997. - Temporal variation of $\delta^{13}C$ in particulate organic matter and oyster *Crassostrea gigas* in Marennes-Oléron bay (France): Effect of freshwater inflow. *Mar. Ecol.Progr. Ser*., 147: 105-115.

RIERA P., STAL L.J., NIEUWENHUIZE J., RICHARD P., BLANCHARD G. & F. GENTIL, 1999. - Determination of food sources for benthic invertebrates in a salt marsh (Aiguillon Bay, France) by carbon and nitrogen stable isotopes: Importance of locally produced sources. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 187: 301-307.

RUESS L., HAGGBLOM M.M., LANGEL R. & S. SCHEU, 2004. - Nitrogen isotope ratios and fatty acid composition as indicators of animal diets in belowground systems. *Oecologia*, 139: 336-346.

SCRIMGEOUR C.M. & D. ROBINSON, 2003. - Stable isotope analysis and applications. In: Soil and Environmental Analysis: Modern Instrumental Techniques (Smith K.A. & M. S. Cresser, eds), pp. 381-431. Marcel Dekker Inc.

SWEETING C. J., BARRY J., BARNES C., POLUNIN N.V. C. & S. JENNINGS, 2007. - Effects of body size and environment on diet-tissues $\delta^{15}N$ fractionation in fishes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol*., 340: 1-10.

VANDER ZANDEN M.J., CASSELMAN J.M. & J.B. RASMUSSEN, 1999. - Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasion in lakes. *Nature*, 401: 464-467.

VANDER ZANDEN M.J. & J.B. RASMUSSEN, 2001. - Variation in $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. *Limnol. Oceanogr*., 46(8): 2061-2066.